

# 连续流分段进水生物脱氮工艺控制要点及优化

王 伟 王淑莹\* 王海东 令云芳 刘智波

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复重点实验室,北京 100022)

**摘 要** 主要介绍了分段进水生物脱氮工艺的系统工作原理及工艺特性,并探讨了该工艺运行操作和设计的几个重要影响因素,如进水流量分配比、溶解氧、污泥回流比、C/N 比等,并在此基础上讨论了分段进水生物脱氮工艺的优化控制对策。

**关键词** 分段进水 生物脱氮 影响因素 优化控制

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1008-9241(2006)10-0083-05

## Factors influencing the step-feed biological nitrogen removal process with continuous flow and its optimizing control

Wang Wei Wang Shuying Wang Haidong Ling Yunfang Liu Zhibo

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

**Abstract** This paper reviews the principle and characteristics of step-feed biological nitrogen removal process. Some important factors regarding the operation and design of the process, e.g. primary effluent flow splitting, dissolved oxygen, returned activated-sludge rates and the ratio of C/N are discussed. Finally, the optimal control strategies of the process are thoroughly discussed.

**Key words** step-feed; biological nitrogen removal; influencing factors; optimal control

1940年,人们提出了分段进水的概念,曾被命名为分段曝气,分段曝气主要是针对传统曝气系统中的操作问题而提出的。20世纪90年代,国外学者又将分段进水的概念应用于脱氮除磷系统,并对此进行了广泛的试验与研究。20世纪90年代初,Lesouef等<sup>[1]</sup>采用模拟的方法对三段式分段进水工艺进行研究,发现该工艺同普通的D-N(前置反硝化)工艺相比可减小20%的HRT(hydraulic retention time,水力停留时间)。Gögün等<sup>[2]</sup>对分段进水工艺的理论去除效果及伊斯坦布尔的Riva处理厂(两段进水)进行了对比研究后指出:三段进水生物脱氮工艺在系统容积最小的情况下,有望取得最好的出水水质。

为了克服传统脱氮除磷工艺的一些缺点:如为增强TN去除率通常需要消耗大量的能量进行硝化液内回流;好氧区自养菌的生长消耗碱度,为提高硝化效率,需要补充碱度等,国外已经有许多新建和扩建的污水处理厂采用了分段进水工艺,并取得了很好的处理效果。美国的Lander Street污水处理厂,夏季HRT为4.8h,冬季为5.7h的条件下,出水氨氮可达0.2~0.8mg/L以下<sup>[3]</sup>;加拿大的Lethbridge

污水处理厂(4900m<sup>3</sup>/d)通过改造成五段分段进水生物除磷脱氮工艺,整个系统的平均MLSS(混合液悬浮固体浓度)比改造前提高18%,并在1年的调试运行中取得了出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N小于0.5mg/L、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N小于5mg/L的效果<sup>[4]</sup>;目前国外还有许多正在建设或运行中的大、中型污水处理厂采用分段进水工艺,如美国的Santa Clara污水处理厂(630000m<sup>3</sup>/d)、Lower Potomac污水处理厂(250000m<sup>3</sup>/d)<sup>[3]</sup>。

国内在20世纪90年代末开始关注分段进水生物脱氮除磷工艺。邱慎初等<sup>[4]</sup>对分段进水生物除磷脱氮系统的发展现状、工艺特性和应用前景等进行了综述;Peng Y. Z等<sup>[5]</sup>对四段进水连续流生物脱氮工艺进行了试验研究,并对分段进水生物脱氮工艺的理论去除效率进行了推导,提出了分段进水

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50478040);北京市科委国际合作项目;北京市属市管高等学校人才强教“创新团队”资助项目

收稿日期:2005-09-10;修订日期:2006-01-14

作者简介:王伟(1979~),女,博士研究生,主要从事污水生物处理及其自动控制的研究。

E-mail:wang\_wei2005@emails.bjut.edu.cn

\*通讯联系人, E-mail:wsy@bjut.edu.cn

生物脱氮工艺水力控制 SRT 的方法,以及以 C/N 比作为分段进水生物脱氮工艺的模糊控制参数的可行性<sup>[6]</sup>。但国内对该工艺的研究总体上还处于起步阶段,目前尚没有采用分段进水生物脱氮除磷工艺的污水处理厂及处理设施存在。

## 1 分段进水生物脱氮工艺原理

分段进水生物脱氮工艺通常由 2~4 段缺氧/好氧顺序排列组成。原水分别在各段的缺氧区进入反应器,回流污泥回流到系统的首端,通常不设内回流设施。

第一段的缺氧区主要对回流污泥中的  $\text{NO}_x^- \text{-N}$  进行反硝化,同时,进入该区的污水 ( $Q_1$ ) 为反硝化提供碳源。然后,混合液流入第一段的好氧区进行硝化反应,反应后的混合污水流入到第二段的缺氧区进行反硝化,同时,第二段缺氧区进入的污水 ( $Q_2$ ) 为反硝化提供碳源。混合液再进入到第二段的好氧区进行硝化反应,以后各段以此类推。由于最后一段进入的污水只发生了硝化反应,没有反硝化的条件,所以出水将含有一定的硝态氮。因此,对出水总氮有严格要求的污水处理工程,可以考虑最后一段不投加污水,只投加外碳源,并在最后的好氧区加大曝气量,以去除碳有机物。分段进水生物脱氮工艺的原理如图 1 所示(以四段式为例)。

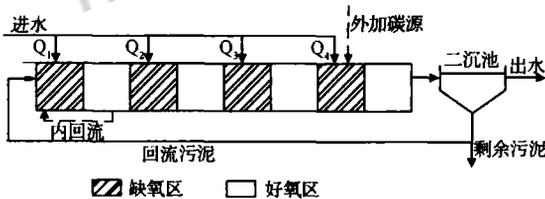


图 1 分段进水生物脱氮工艺原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of step-feed biological nitrogen removal process

## 2 工艺特性

### 2.1 工艺优点

(1) 多段 A/O (缺氧/好氧) 顺序排列,无需设置硝化液内回流设施,节省内回流所需能量,并可大大减小二沉池的体积;(2) 由于污水分散进入各段,其总的稀释作用被推迟,因而前面各段的 MLSS 高于后面几段。在流入终沉池的 MLSS 相同的情况下,分段进水 BNR (biological nutrient removal, 生物营养物去除) 工艺比常规 BNR 工艺通常具有较多的污泥储量和较长的 SRT (solid retention time, 固体

停留时间)。设置不同的进水点和不同的进水流量分配比,可使分段进水 BNR 系统的平均 MLSS 较普通的 BNR 系统增加 35%~70%<sup>[3]</sup>,从而增加了单位池容的处理能力;(3) 缺氧区进水,可以充分利用原水中的易生物降解 COD,为反硝化提供碳源,从而节省外碳源投加量;另外,缺氧区进水,反硝化消耗大量的可利用碳源,因此进入好氧区的可利用碳源较少,异养菌的生长受到限制,利于自养硝化菌的生长;(4) 缺氧区和好氧区交替存在,因此,缺氧区产生的碱度对好氧区的碱度损失有一定的弥补,可以减少碱性物质的投加量甚至不加;(5) 由于污水分散进入反应池,当暴雨产生洪峰流量时,不易引起污泥的冲刷流失。

### 2.2 局限性

(1) 原水多点投配,与只首端进水的推流反应器相比,其更加趋向于完全混合,分段越多,这种现象越明显;(2) 缺氧/好氧区交替存在,从好氧区流入到缺氧区的混合液不可避免地携带部分溶解氧,若控制不利,可能致使异养菌与反硝化菌竞争进水中的易降解 COD,对低 C/N 比的生活污水来说,将使得反硝化碳源不足的问题更加严重;(3) 运行和操作的灵活性,也给分段进水工艺的设计和控制在带来一定的复杂性。

## 3 影响因素及控制要点

### 3.1 进水的流量分配

进水流量分配是系统结构设置及运行控制的重要影响因素。通常,原水从不同的进水点进入反应器,回流污泥回流到系统的首端。由于进水对回流污泥稀释作用的延迟,系统 MLSS 沿池长呈梯度分布,前段的污泥储量较大。不同的流量分配导致各段不同的 MLSS 浓度,从而影响系统的 SRT。由于系统前段 MLSS 较高,因此,在洪峰流量时,可以加大最后一段的进水流量比,以减小污泥被冲失的危险。

另外,流量分配的控制还取决于系统运行的限制因素。如冬季,硝化受限制时,可以调整流量分配比,减小最后一段或两段的进水量,延长硝化时间,从而达到系统较好的硝化效果。当 BNR 系统能完全硝化时,反硝化将受到限制。为提高系统对 TN 的去除效果,需调整流量分配比,使得各缺氧区剩余的可用碳源最少。每段缺氧区进入的污水量 (以  $\text{COD}_s$  表示) 与前段产生的硝态氮量 (以  $\text{NO}_x^- \text{-N}$  表示) 的比值,即  $\text{COD}_s/\text{NO}_x^- \text{-N}$ ,决定了系统的 TN 去除效果<sup>[7]</sup>。

### 3.2 溶解氧

分段进水生物脱氮工艺中,由于工艺结构的特点,缺氧区和好氧区的交替较为频繁。因此,由好氧区到缺氧区的溶解氧(DO)携带问题是必须考虑的重要问题之一。在满足硝化反应完成和剩余碳有机物去除的情况下,最大程度上降低曝气量可使得由好氧区到缺氧区 DO 的携带量明显减少,可以为反硝化提供良好的缺氧环境并减少缺氧区可快速降解有机碳源的消耗。在纽约某污水处理厂进行分段进水中试验发现,通过减小系统的返混现象和降低前段的好氧区到下一段缺氧区的 DO 的携带量,出水 TN 从 11 mg/L 降到了 6 mg/L<sup>[8]</sup>。

另外,控制较低的 DO 浓度有利于同步硝化反硝化等现象的发生,从而提高系统的脱氮效果。Larrea 等<sup>[9]</sup>对三段式分段进水生物脱氮工艺的研究中发现,在不改变入流分配比的前提下,适当降低中间好氧区的溶解氧浓度,可导致同步硝化反硝化的发生,提高了系统脱氮能力,同时也减少了从好氧区到缺氧区溶解氧的携带量。作者在对四段进水生物脱氮工艺的研究中也发现,一定条件下,当各好氧区的平均 DO 浓度从 2.5 mg/L 降到 1.0 mg/L 以下时,系统的 TN 去除率提高了 10% 左右,并在好氧区出现了稳定的同步硝化反硝化现象,且系统可长期在这种低氧的条件下稳定运行。

为了减少由好氧区到缺氧区 DO 的携带量,有人提出在每一段的好氧区的最后设置脱氧区,即不曝气或少量曝气区域,使得混合液中的 DO 在进入下一段的缺氧区之前得以降低。每个脱氧区的大小约是整个系统体积的 1.5%<sup>[8]</sup>。但是由于分段进水 BNR 系统各段混合液的浓度各不相同,脱氧区的体积设置一般也不相同。设计时,脱氧区的大小通常要根据各好氧区末端预计的 DO 值、系统进水流量、设计 SRT 下每段的固体浓度等进行估算。不同的污水处理设施,由于系统结构、出水要求、运行条件等的不同,脱氧区的大小将会有很大差别。

有资料表明,一个典型的污水处理厂,曝气耗费往往占全厂运行费用的 60%~80%<sup>[10]</sup>,曝气所占的电能约占整个污水厂能耗的 50%<sup>[11]</sup>。因此,在分段进水工艺的运行中,控制较低的 DO 浓度,无论对于处理效果还是运行费用都是非常有意義的。但是,DO 浓度也不是越低越好。较低的 DO 可能会使硝化反应速率降低,导致出水  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  含量增高,并可能导致污泥膨胀现象。为满足出水要求,同时节约能源,可以考虑在系统末端设置 DO 和氨氮浓度

的在线检测仪器,并建立以 DO 和氨氮浓度为控制参数的简单控制器,如 PI/PD 控制器,根据出水氨氮值及时调整曝气量以满足出水要求。

### 3.3 C/N 比

生物反硝化过程是在无分子态氧存在的条件下,反硝化菌利用  $\text{NO}_x^- \text{N}$  作为电子受体,有机物作为碳源及电子供体,将  $\text{NO}_x^- \text{N}$  还原成  $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$  等气体,从系统中去除。因此,碳源对于反硝化过程来说必不可少。理论上将 1 g  $\text{NO}_3^- \text{N}$  还原为  $\text{N}_2$  需要碳源有机物(以  $\text{BOD}_5$  表示) 2.86 g。一般认为,反硝化反应器中污水的  $\text{BOD}_5/\text{TKN}$  值大于 4~6 时,可认为碳源充足。一些工艺,如 A/O 工艺,C/N 需求可高达 8 左右<sup>[12]</sup>。

原水 C/N 是影响分段进水生物脱氮工艺 TN 去除效率及外碳源投加量的重要因素。对于分段进水工艺,原水分别在缺氧区进入反应器,为缺氧区的反硝化提供碳源。对于高 C/N 比的污水而言,原水可为反硝化提供充足的碳源,条件合适的情况下,反硝化会彻底完成,而剩余的有机物会在接下来的好氧区去除,系统的 TN 去除率取决于其他的环境因素。但对低 C/N 的污水而言,原水提供的碳源不足以使反硝化进行完全,使得每一段都有剩余的硝态氮产生,并不断地累积到后段。

对于碳源受限制的污水处理工程的设计,必须考虑最大程度地提高对原水中可降解有机碳源的利用。因此,在工艺设计时,缺氧区反硝化能力的确定必须考虑 C/N 比的影响,条件允许的情况下,可适当增大缺氧区的有效容积,延长反硝化时间,以充分利用原水中的可降解碳有机物。另外,对脱氮要求较高的污水处理工程,可通过 2 种途径来提高 TN 去除效果:一种是提高初沉池出水 C/N 比,另一种则是在系统内投加碳源。当进水流量非均匀分配时,提高初沉池 C/N 通常不是很经济,如进水流量分配比为 0.2 0.4 0.4 的三段进水脱氮系统,第二段缺氧区进入的硝态氮只占进水的 20%,而进水量则占 40%,因此第二段进入的原水中的碳源可能不会被充分利用。理论上,应根据每段的好氧区的剩余硝态氮的量,在其下一段的缺氧区投加碳源,但是,这必然使得分段进水生物脱氮系统的运行变得更加复杂。在分段进水系统中,通常考虑根据最后一段的剩余  $\text{NO}_x^- \text{N}$  量来投加碳源物质<sup>[13]</sup>。为保证出水水质和节省碳源,可以考虑在系统最后区域设置硝态氮在线检测仪器或通过氧化还原电位(ORP)同硝态氮之间的相关关系来反映出水情况,

并以在线硝态氮及 ORP 值作为外碳源投加的过程控制参数,建立外碳源投加控制器,及时调整外碳源的投加量。ORP 在线装置投资较小,但将 ORP 作为连续流过程控制参数的成功先例较少,因此采用 ORP 作为连续流分段进水生物脱氮工艺的外碳源投加控制参数的可行性还有待于进一步研究。

### 3.4 污泥回流比

分段进水生物脱氮工艺中,回流污泥通常回流到系统首端。污泥回流比的大小对 TN 去除率及系统平均 MLSS 具有一定的影响。

一方面,第一段的缺氧区主要对回流污泥中的硝态氮进行反硝化。因此,不同的污泥回流比对系统 TN 的去除效果必然会有一定影响。如果系统首段缺氧区具有合适的反硝化条件,提高污泥回流比,可以使得回流到系统首段的硝态氮量增加,充分利用首段缺氧区的反硝化能力,增加 TN 的去除量。另一方面,原水分别在各缺氧区进入反应器,进水对回流污泥总的稀释作用相当于推迟了,因此,回流污泥浓度对系统前两段污泥浓度的影响较大,从而对系统的平均 MLSS 影响较大,最终影响系统的 SRT。

Daigger 等<sup>[3]</sup>的研究指出,对分段进水的污泥回流比等参数进行适当的控制可以使得分段进水 BNR 系统的平均 MLSS 较普通的 BNR 系统增加 35% ~ 70%; Norbert 等<sup>[14]</sup>对三段式分段进水生物脱氮系统(污水以相同的比例投配到系统)的研究发现,系统平均的 MLSS 比完全混合法高 27% 左右。在分段进水 BNR 系统中,由于原水分散进入反应器,而回流污泥回流到系统首端,因此,污泥回流比及回流污泥浓度对 MLSS 影响较大。对于分段进水 BNR 系统的设计,在设定系统出口处的 MLSS 的前提下,通常控制较低的污泥回流比(0.25 ~ 0.75),以提高二沉池回流污泥的浓度,从而提高系统前两段的 MLSS<sup>[15]</sup>。

但在分段进水的实际运行控制过程中,污泥回流比的大小是不能随意改变的。污泥回流比的改变,必然导致二沉池污泥含固量改变,若剩余污泥排放量不变,系统的固体停留时间必将受到影响,从而影响系统的处理能力。通常,需要根据具体的水质、水量,选定合适的污泥回流比,并控制系统各段 MLSS 及剩余污泥的排放量,以达到系统的相对稳定。特殊情况下如需改变系统的污泥回流比,则必须对系统各段的 MLSS 重新考察,并重新确定剩余污泥的排放量。

### 3.5 缺氧区与好氧区的体积比 ( $V_{\text{缺}}/V_{\text{好}}$ )

分段进水工艺中,由于缺氧、好氧区交替排列,因此无需设置硝化液内回流设施。各段好氧区主要对本段缺氧区进水的氨氮进行硝化,产生的硝态氮在下一段的缺氧区进行反硝化,第一段的缺氧区主要对回流污泥中的硝态氮进行反硝化。这个意义上讲,各段好氧区的设置由进入该段的污水量来决定,且只有当每段好氧区产生的硝态氮量( $\text{NO}_{\text{前段}}$ )和后段缺氧区的反硝化能力( $\text{N}_{\text{D,后段}}$ )相当的情况下,即  $\text{NO}_{\text{前段}} = \text{N}_{\text{D,后段}}$  时,出水硝态氮浓度将最低。

各段的  $V_{\text{缺}}/V_{\text{好}}$  主要由进水水质、出水要求及入流分配比来决定<sup>[2]</sup>。通常情况下, $V_{\text{缺}}/V_{\text{好}}$  是进水 C/N 的函数,即  $V_{\text{缺}}/V_{\text{好}} = f(\text{C}/\text{N})$ 。合理的  $V_{\text{缺}}/V_{\text{好}}$  将使各段缺氧区和好氧区的处理能力得到充分发挥。

但 Larea 等<sup>[9]</sup>的研究结果表明,总流量不变及碳源充足的前提下,好氧区容积之和与系统总容积之比(即好氧区容积占总容积的百分比)与入流分配比无关,同普通的 D-N 流程相类似(60%左右)。因此,对于分段进水工艺的设计,总的缺氧区体积及好氧区体积,可以参考传统的 D-N 系统进行设计,每段的  $V_{\text{缺}}/V_{\text{好}}$  则需要根据水质及入流分配比来确定。

### 3.6 其他

#### 3.6.1 温度

温度对硝化反硝化过程的影响较大。温度较低时,硝化和反硝化速率明显降低。作者采用四段进水生物脱氮工艺对小区生活污水进行研究时发现,在不投加碳源的情况下,当系统温度从 20 升高到 30 时,硝化、反硝化速率均迅速提高,TN 去除率亦从 72% 左右迅速升高到 85% 左右。当然,对污水处理厂而言,控制反应温度不切实际。但在实际的运行中,仍然需要考虑温度等环境因素的影响。并以这些影响因素为参考,调整系统的其他运行参数,提高系统处理能力,从而增强处理效果。

#### 3.6.2 MLSS

通常情况下,系统较高的 MLSS 可导致较长的固体停留时间,从而提高系统的处理能力。对于分段进水工艺,原水多点投配导致 MLSS 沿池长呈梯度分布,前段 MLSS 较高,末段 MLSS 较低。末段较低的 MLSS 浓度对二沉池泥水分离及后续污泥处理非常有利。因此,分段进水生物脱氮工艺的设计,通常不必考虑二沉池泥水分离及后续污泥处理问题,可以尽可能地控制系统较高的 MLSS 浓度,以提高系统处理能力,缩小生物反应器的体积<sup>[16]</sup>。

### 3.6.3 内回流系统

分段进水工艺中,由于缺氧、好氧反应区顺序排列,通常无需设置硝化液内回流设施。但研究发现,在三段或四段分段进水工艺中,当原水 C/N 比充足时,由于第一段的缺氧区只对回流污泥中的硝态氮进行反硝化,其处理能力往往过剩。此时,为提高系统的 TN 去除率,可考虑将第一段的好氧区产生的硝化液以内回流的形式投加到第一段的缺氧区,充分利用第一段缺氧区的反硝化能力,从而强化系统对 TN 的去除效果<sup>[14]</sup>。内回流系统的设置较为灵活,可以在不同的段之间设置内回流系统,如在四段分段进水工艺中,可以将第四段的硝化液回流到系统第一段的缺氧区。但是,内回流系统的设置也可能给系统带来一定的问题,如将后面几段的硝化液回流到系统的前段,可能导致前段反应器固体浓度的降低,从而降低系统的 SRT。回流系统的设置应根据具体的水质进行考虑,碳源受限制的系统通常不需要设置内回流系统。

### 3.6.4 搅 拌

缺氧区不供氧,因此,必须对其进行连续、充分搅拌,使污泥处于悬浮状态。否则,缺氧区由于反硝化产生的气体可能使污泥大面积上浮,影响系统正常的污泥循环,破坏系统的正常运行。

## 4 结 语

分段进水缺氧好氧生物脱氮工艺是一种新型高效的生物脱氮工艺。其具有不用设置内回流设施,污泥储量较大,运行操作灵活等优点。而且对于已经建成的不具脱氮除磷功能的污水处理厂来说,改造成分段进水缺氧好氧生物脱氮工艺非常简单、可行<sup>[15]</sup>。因此,近年来该工艺在国内外受到了广泛关注,工艺也从基础性研究发展到工程应用阶段。但由于该工艺在结构设置和运行参数等方面的复杂性,以及系统平衡对 C/N 比所表现出来的极大的敏感性<sup>[2]</sup>,使得分段进水工艺的运行和优化一直是一个难题。但目前,由于在线监测技术及智能控制的应用与发展,为分段进水工艺的运行控制问题提供了很好的解决途径。利用这些技术,可以提高分段进水生物脱氮工艺的实际可操作性。

## 参 考 文 献

- [1] Lesouef A., Payraudeau M., Rogalla F., et al. Optimizing nitrogen removal reactor configurations by on-site calibration of the AWPRC activated sludge model. *Wat Sci Tech*, **1992**, 25 (6): 105 ~ 123
- [2] Gög ün E., Artan N., Orhon D., et al. Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants. *Wat Sci Tech*, **1996**, 34 (1 ~ 2): 253 ~ 260
- [3] Daigger G. T., Parker D. S. Enhancing nitrification in North American activated sludge plants. *Wat Sci Tech*, **2000**, 41 (9): 97 ~ 105
- [4] 邱慎初,丁堂堂. 分段进水生物除磷脱氮工艺. *中国给水排水*, **2003**, 19 (4): 32 ~ 36
- [5] Peng Y. Z., Zhu G. B., Wang S. Y. Evaluation of nitrogen removal in step-feed biological nitrogen removal process. The First International Conference on Environmental Science and Technology. New Orleans, Louisiana, USA, January 23 ~ 26, **2005**
- [6] Peng Y. Z., Zhu G. B., Wang S. Y. Use of C/N ratio as fuzzy control parameter for improved nitrogen removal in step-feed biological nitrogen removal process. ISEIS 2004 International Conference Environmental Informatics Regina, Saskatchewan, Canada, August 25 ~ 27, **2004**
- [7] Chang H. Y., Ouyang C. F. Improvement of nitrogen and phosphorus removal in the anaerobic-oxic-anoxic-oxic (AOAO) process by stepwise feeding. *Wat Sci Tech*, **2000**, 42 (3 ~ 4): 89 ~ 94
- [8] Christine deBadillo, Luis C., et al. Practical considerations for design of a step-feed biological nutrient removal system. *Florida Water Resources Journal*, **2002**, (1): 18 ~ 20
- [9] Larrea L., Larrea A., Ayesa E., et al. Development and verification of design and operation criteria for the step feed process with nitrogen removal. *Wat Sci Tech*, **2001**, 43 (1): 261 ~ 268
- [10] 李慧君,岳晓勤,王蔚蔚,等. 废水好氧生物处理中曝气技术的现状和研究动向. *西安建筑科技大学学报*, **2003**, 35 (3): 268 ~ 271
- [11] 王维斌. 污水处理中减少污泥产量的方法和机理. *给水排水*, **2001**, 27 (10): 38 ~ 42
- [12] 郑兴灿,李亚新. 污水除磷脱氮技术. 北京:中国建筑出版社, **1998**
- [13] Ouyang C. F., Chou Y. J. Optimization of enhanced biological wastewater treatment processes using a step-feed approach. *Wat Sci Tech*, **2001**, 43 (3): 295 ~ 304
- [14] Norbert J., Harro B. Nutrient upgrades to meet European requirements. *WA Yearbook*, **2003**, (7): 53 ~ 55
- [15] Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 北京:清华大学出版社, **2003**
- [16] Adamski R. E., Desantici V. Step-feed operation at short detention times—a cost effective method for improving wastewater treatment. *Wat Sci Tech*, **2000**, 41 (9): 15 ~ 20



论文写作，论文降重，  
论文格式排版，论文发表，  
专业硕博团队，十年论文服务经验



SCI期刊发表，论文润色，  
英文翻译，提供全流程发表支持  
全程美籍资深编辑顾问贴心服务

免费论文查重：<http://free.paperyy.com>

3亿免费文献下载：<http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重：[http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载：<http://ppt.ixueshu.com>

---